

УДК 523.44

АСТЕРОИДЫ 1 ЦЕРЕРА И 4 ВЕСТА: ОБЪЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ DAWN

© 2009 г. Д. Ф. Лупишко¹, Р. А. Мохамед²

¹НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Украина

²Гарьюновский университет, факультет естественных наук, Бенгази, Ливия

Поступила в редакцию 06.01.2009 г.

В сентябре 2007 г. к астероидам 1 Церера и 4 Веста стартовал космический аппарат миссии NASA Dawn. Выбор этих двух астероидов глубоко обоснованный – это крупнейшие, наиболее массивные и совершенно разные по составу вещества, эволюционной истории и внутреннему строению объекты главного пояса. Результаты наблюдений и численного моделирования в последние годы показали их удивительную уникальность: оба они прошли сложный процесс тепловой эволюции и дифференциации своих недр, но при этом приобрели совершенно различное внутреннее строение. Являясь крупнейшими телами, они смогли противостоять процессам столквительной эволюции в поясе астероидов и сохраниться в “первозданном виде”, поэтому их изучение представляется очень важным с точки зрения космогонических проблем пояса астероидов и Солнечной системы в целом. Настоящий обзор кратко резюмирует последние достижения в изучении Цереры и Весты, полученные по наземным наблюдениям (включая и поляриметрические наблюдения авторов) и с помощью ИСЗ Hubble Space Telescope накануне длительных орбитальных исследований их космическим аппаратом Dawn.

PACS: 96.25.-f, 96.25.fc, 96.25.hj, 96.30.Ys

ВВЕДЕНИЕ

Космический аппарат миссии Dawn к астероидам главного пояса 1 Церера и 4 Веста успешно стартовал 27 сентября 2007 г. с мыса Канаверал (шт. Флорида, США) и после гравитационного ускорения притяжением Марса в феврале 2009 г. должен достигнуть окрестностей Весты в августе 2011 г. и Цереры – в феврале 2015 г., преодолев путь длиной 4.8×10^9 км.

Почему выбраны именно эти два астероида? Церера и Веста являются крупнейшими и наиболее массивными телами главного пояса, которые содержат около 35% его массы (см. их размеры, массы и плотности в табл. 1). Как крайние члены распределения астероидов по размерам, они существенным образом влияют на ограничение возможных теорий происхождения астероидов главного пояса, их тепловую и столквительную эволюцию (Mitchel и др., 1996). Однако более существенным является то, что эти два астероида являются совершенно разными по составу вещества, по их эволюционной истории и по внутреннему строению. Результаты телескопических наблюдений и численных модельных экспериментов, проведенных в последние годы, показали новый облик этих объектов и их удивительную уникальность – это не застывшие глыбы вещества (как иногда представляют астероиды), а тела со сложным внутренним строением, приобретенным в процессе сложной эволюции, и активной в прошлом поверхностью. Будучи крупнейшими и наиболее массивными, Це-

рера и Веста сохранились на протяжении всей истории существования и эволюции пояса и поэтому, предполагается, что их детальное изучение даст многое для понимания наиболее ранних этапов формирования Солнечной системы, включая и происхождение самого пояса астероидов.

Космический аппарат Dawn укомплектован ПЗС-камерой (1024 × 1024 пикселей) для получения изображений поверхности, спектрометром для картирования поверхности в визуальных/ИК-лучах, гамма/нейтронным спектрометром, магнетометром, гравиметром и радаром. Он будет проводить исследования в течение пяти месяцев на орбите вокруг Цереры и в течение 9 месяцев – на орбите вокруг Весты. Предполагается, что будет получена самая разнообразная информация об этих двух астероидах: о плотности и однородности вещества, гравитационном поле, моменте инерции и внутренней структуре (по измерениям массы, формы, объема и состояния вращения), о тепловых свойствах, остаточной намагниченности пород, элементном и минеральном составе, что прольет свет на тепловую историю этих астероидов (Russell и др., 2004). Кар-

Таблица 1. Средние значения диаметров, масс и плотностей астероидов

Астероид	D , км	$M \times 10^{-23}$, г	ρ , г/см ³
1 Церера	947 ± 8	9.49 ± 0.06	2.06 ± 0.05
4 Веста	529 ± 10	2.70 ± 0.02	3.5 ± 0.2

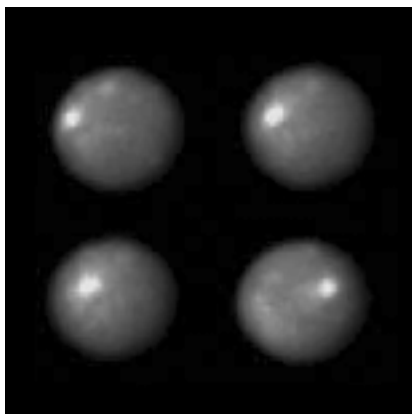


Рис. 1. Изображения Цереры, полученные с помощью ИСЗ HST. Яркое пятно на изображениях не соответствует реальной градации, а лишь подчеркивает его чуть большее альbedo по сравнению с окружающей поверхностью.

тирование поверхностей позволит восстановить процессы их переработки, включая бомбардировку, тектоническую и, возможно, вулканическую активность, а ИК-, гамма и нейтронная спектрометрия будут использованы для поиска воды и содержащих ее силикатов. Среди основных научных задач миссии отмечаются следующие (Rayman и др., 2006; Russell и др., 2006):

- определение объемной плотности обоих астероидов с точностью не хуже 1%;
- определение вектора угловой скорости осевого вращения обоих астероидов с точностью ≤ 0.5 град;
- измерение гравитационного поля Весты не менее, чем до 9-й гармоники и Цереры не менее, чем до пятой.
- получение изображений около 80% поверхностей (в интегральном свете и в трех фильтрах) и на их основе топографическое картирование обоих астероидов с разрешением вдоль поверхности 100 и 200 м и по высоте 10 и 20 м для Весты и Цереры, соответственно;
- измерение путем комбинации гамма- и нейтронной спектрометрии и картирование содержания основных породообразующих элементов (O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe) с точностью $\leq 20\%$, а также обнаружение радиоактивных элементов H, K, Th и U в верхнем слое поверхностей обоих астероидов;
- получение ≥ 10 тыс. кадров поверхности Весты и ≥ 8 тыс. кадров поверхности Цереры в интервале длин волн 0.25–5 мкм со спектральным разрешением ≤ 10 нм и пространственным разрешением ≤ 200 м/пиксель (около 50% кадров) и ≤ 800 м/пиксель (для остальных кадров) для Весты и с вдвое меньшим разрешением для Цереры.

Чтобы правильно спланировать эксперимент, понять и правильно объяснить данные предполагаемых измерений, необходимо подытожить и осмыс-

лить все, что мы уже узнали об этих астероидах на основе наземных наблюдений, а также с помощью ИСЗ Hubble Space Telescope (HST).

ФОРМА, ОСЕВОЕ ВРАЩЕНИЕ И МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Церера представляет собой сплюснутый астероид с отношением экваториальной к полярной оси $a : c = 1.07$, которое соответствует гравитационно равновесному телу (Thomas и др., 2005). Анализируя изображения Цереры в ультрафиолетовой области спектра, полученные с высоким разрешением на HST, Parker и др. (2002) обнаружили большую округлую морфологическую деталь на поверхности диаметром около 250 км, которая была названа в честь первооткрывателя астероида J. Piazzi – Piazzi. Однако в общем Церера не показывает заметных вариаций альbedo по поверхности (рис. 1), поскольку кроме более темной детали Piazzi не обнаружено значительных глобальных различий в интегральном альbedo в зависимости от фазы вращения. Очень малая амплитуда кривой блеска Цереры (0.04 зв. вел.) подтверждает сказанное. Несколько позже были составлены первые карты альbedo Цереры в трех длинах волн по данным HST-наблюдений (Li и др., 2006), с помощью которых было выявлено 11 альбедных и цветовых деталей на поверхности размерами 40–350 км. Тем не менее диапазон альбедных вариаций поверхности Цереры остается значительно меньшим по сравнению с другими астероидами или ледяными спутниками, что может указывать на очень активные процессы на поверхности в прошлом, в результате которых могло произойти смешение вещества поверхности и мантии (Li и др., 2006). Предполагается (см. Asteroid 1 Ceres на вебсайте “The Planetary Society”), что Церера внешне выглядит как монотонно серый спутник Сатурна Диона с его кратерами и горными хребтами.

Как известно из наземных и, особенно, полученных на ИСЗ HST данных, форма и морфология поверхности Весты совершенно иная. На изображениях обнаружен громадный кратер диаметром 460 км (сравни с диаметром самого астероида в табл. 1) с центром вблизи южного полюса (Thomas и др., 1997). Кратер занимает большую часть южного полушария астероида, имеет глубину 13 км и в значительной степени определяет форму Весты (рис. 2). Ясно, что столкновение, приведшее к его образованию, было близким к катастрофическому для астероида такого размера, как Веста. Церера и Веста различаются скоростями осевого вращения (см. периоды их вращения в табл. 2), хотя имеют подобную ориентацию осей вращения в пространстве. Ось вращения Весты больше наклонена к плоскости эклиптики (чем у Цереры), кроме того, Веста вращается существенно быстрее других крупных астероидов. Вполне вероятно, что столкновение ее с другим астероидом не только привело к образованию ги-

Таблица 2. Параметры вращения и формы астероидов

Астероид	P_{rot} , ч	Амплитуда кривой блеска, зв. вел.	Соотношение осей	Координаты полюса
1 Церера	9.075	0.04	1.07 : 1.07 : 1	$\lambda_0 = 315^\circ, \beta_0 = 74^\circ$
4 Веста	5.342	0.12	1.26 : 1.22 : 1	$\lambda_0 = 336^\circ, \beta_0 = 57^\circ$

гантского кратера на ее поверхности, но и заметно повлияло на состояние вращения.

МИНЕРАЛОГИЯ

Спектр Цереры показывает сильное УФ-поглощение на длинах волн короче 0.4 мкм, является плоским в видимой и ближней ИК областях и имеет полосу поглощения связанной воды на 3.05 мкм (Lebofsky и др., 1981), указывающую на присутствие гидратированных силикатов (см. рис. 3, 4). Эту полосу связывают также с возможным существованием на поверхности Цереры изморози, образующейся при просачивании газообразной H_2O через реголит. В общем, спектр Цереры согласуется со спектром относительно примитивных и не подвергавшихся значительному нагреву углистых хондритов, однако более точно состав вещества ее поверхности не известен и пока не найден точный спектральный аналог ей среди метеоритов. Недавно Rivkin и др. (2006), анализируя редуцированные к нормальной температуре спектры Цереры, указали на присутствие 4–6% карбонатов на ее поверхности, подобно содержанию их в веществе углистых хондритов С1-типа. Эти карбонаты ответственны за полосы поглощения в области 3.3 и 3.8–3.9 мкм, а полосу на 3.05 мкм можно объяснить наличием обогащенных железом глинистых минералов –

филлосиликатов (Rivkin и др., 2006). Результаты микроволновых наблюдений (Webster, Johnston, 1989) тоже были объяснены содержанием филлосиликатов. А их присутствие однозначно указывает на то, что вода играла важную роль в эволюции поверхности Цереры. Подтверждением этого вывода можно считать обнаружение американскими учеными A’Hearn и Feldman (1992) эмиссии молекул радикала ОН ($\lambda 3080 \text{ \AA}$), образующихся вокруг Цереры в результате фотодиссоциации молекул воды. По их данным количество молекул ОН варьируется во времени, а также, вероятно, и в пространстве вокруг Цереры. Иными словами, ОН-атмосфера Цереры не симметрична, что, по их мнению, согласуется с предположением о существовании на этом астероиде северной полярной шапки, состоящей из замерзшей H_2O , которая в течение зимы аккумулируется путем просачивания подпочвенной воды, а летом сублимирует. Подпочвенный водяной лед мог сохраниться на Церере на протяжении всей истории Солнечной системы и, поэтому, наиболее вероятным составом вещества ее поверхности могут быть метаморфизированные в процессе водной переработки глинистые минералы и около 25% воды/льда. Заметим, что присутствие такого большого количества H_2O вытекает из сравнения средней плотности Цереры (табл. 1) и плотности аналогов

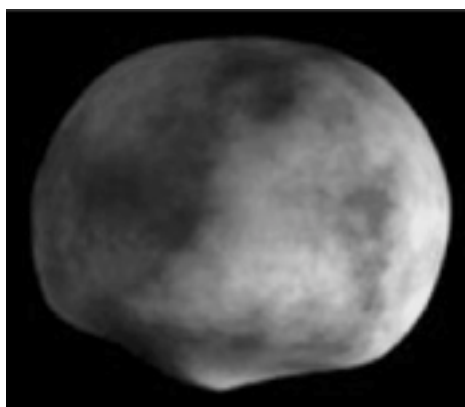


Рис. 2. Изображение Весты с ее альбедными и морфологическими особенностями, полученное Zellner и Thomas (1997) в результате компьютерной обработки данных наблюдений на HST. Почти все южное полушарие (нижняя часть изображения) занимает гигантский с $D = 460$ км кратер с центральной горкой.

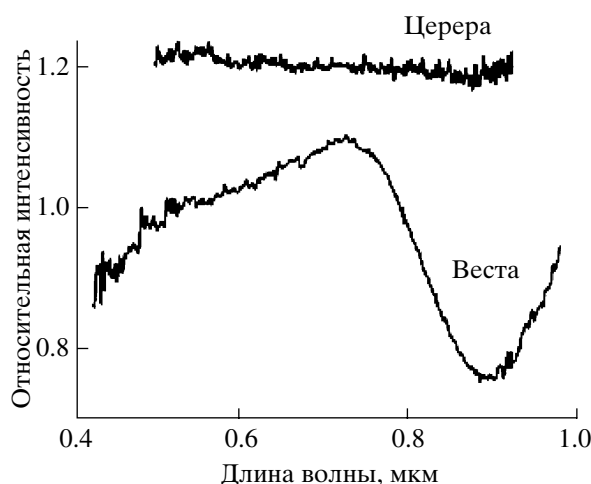


Рис. 3. Спектры отражения Цереры и Весты в видимой и ближней ИК-области (Russel и др., 2004).

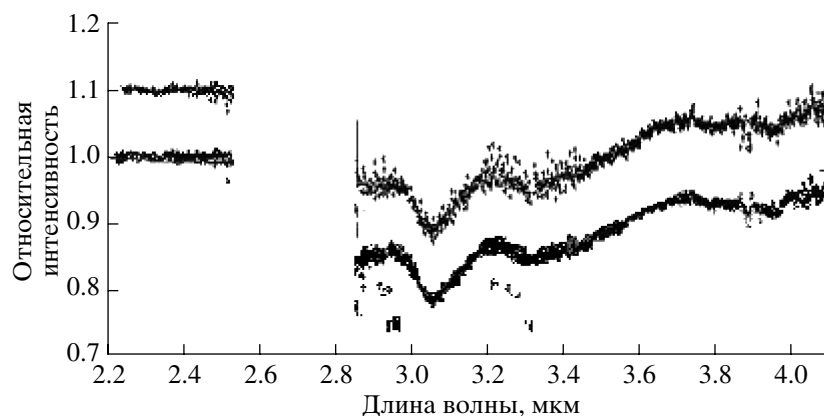


Рис. 4. Полоса кристаллизационной воды в спектре Цереры на 3.05 мкм (Rivkin и др., 2006). Верхняя кривая – наблюдения 17 мая, а нижняя – 18 мая 2005 г.

ее вещества – углистых хондритов (McCord, Sotin, 2005; Russel и др., 2006).

С точки зрения минералогии Веста является уникальным астероидом и это впервые выявили спектроскопические наблюдения McCord и др. (1970), показавшие, что вещество поверхности Весты содержит плагиоклаз и пироксен с низким содержанием кальция. Иными словами, спектр отражения Весты допускает четкое отождествление поверхностных минералов с составом метеоритов, а именно – HED-базальтовых ахондритов (howardites, eucrites, diogenites), которые являются магматическими породами, образовавшимися при высоких температурах. А это означает, что Веста прошла стадию плавления и дифференциации недр. Это заключение во

многом стимулировало дальнейшие всесторонние исследования Весты, основанные в том числе и на детальном изучении химии базальтовых ахондритов, с тем, чтобы понять процесс ее эволюции.

Таким образом, в отличие от других крупных астероидов, Веста имеет базальтовую поверхность, которая сохранила на себе следы древней вулканической активности (оливин-содержащие лавовые потоки). Цветовые измерения в ее гигантском кратере глубиной 13 км согласуются с предположением о том, что дно этого кратера достигает переходной зоны между корой из пироксена и верхней оливиновой мантией. Выброшенного из кратера вещества недостаточно для образования семейства небольших вестоподобных астероидов (объектов V-типа), которые могут быть источником базальтовых ахондритовых метеоритов (Binzel, Xu S., 1993; Thomas и др., 1997). Остается не совсем ясным вопрос об отсутствии воды у Весты, средняя плотность которой хорошо соответствует плотности базальтовых ахондритов: или она аккумулировалась из более “сухих” планетезималей по сравнению с Церерой (в среднем, она находится на 0.4 а. е. ближе к Солнцу), или же она потеряла воду в процессе разогрева и дифференциации.

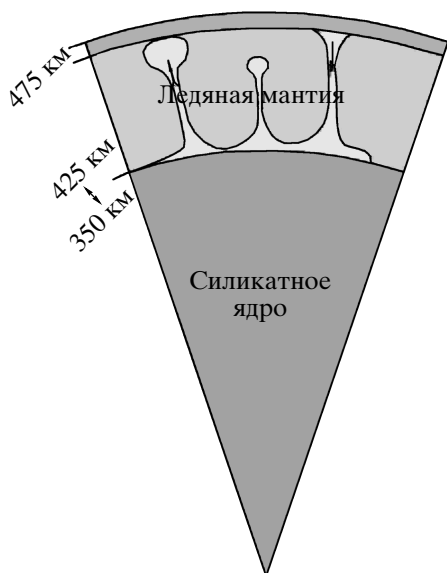


Рис. 5. Модель внутреннего строения Цереры согласно McCord и Sotin (2005).

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ

Недавно McCord и Sotin (2005) предложили модель тепловой эволюции Цереры, в соответствии с которой Церера прошла интенсивную эволюцию и процесс дифференциации вещества, но при этом сохранила большую часть своей воды, включая даже некоторую часть в жидком виде. Согласно модели, из-за разогрева коротко живущими радионуклидами ^{26}Al и накопления внутреннего тепла ее льды должны были расплавиться и отделиться от силикатов. В результате этого процесса сравнительно быстро образовались силикатное ядро и жидкая

мантия с сохранением тонкой промерзшей коры поверхности (рис. 5). По мере истощения радионуклидов Церера постепенно остывала, а жидкая вода при этом замерзала от самых внешних слоев к центру за исключением, возможно, слоя вблизи теплового силикатного ядра, где жидкая вода может существовать до сих пор (рис. 6). Из-за высокого содержания воды/льда силикаты Цереры не могли расплавиться даже в случае разогрева их распадом короткоживущих изотопов ^{26}Al , поскольку плавление льда поглощает энергию, а кроме того, конвективные движения в воде тоже отбирают тепло. Таким образом, в этой модели утверждается, что процесс тепловой эволюции Цереры был заторможен присутствием в ней большого количества H_2O . Однако Церера – дифференцированная и имеет определенную концентрацию массы к центру. В модели также предсказывается гидростатическая форма вращающейся Цереры ($P_{\text{rot}} = 9.075$ ч) с различием между экваториальной и полярной осями в 32 км (McCord, Sotin, 2005).

Для проверки этих предсказаний были проведены наблюдения Цереры с помощью ИСЗ HST (Thomas и др., 2005). Тщательные измерения лимба полученных изображений астероида показали, что Церера – гладкий и сплюснутый сфероид с осями 487.3 ± 1.8 и 454.7 ± 1.6 км. Такая форма действительно является гидростатически равновесной, при этом различие в осях не согласуется с моделью однородного тела и требует концентрации массы к центру. Измеренное различие экваториальной и полярной осей составило 32.6 км, что является довольно редким согласием между теорией и наблюдениями.

В течение долгого времени Веста была единственным известным астероидом с сохранившейся внутренней структурой, включающей металлическое ядро, ультрамафическую мантию и базальтовую кору. Многочисленные минералогические, петрологические, изотопные и хронологические данные предполагают, что разогрев, плавление и образование металлического ядра, мантии и базальтовой коры имели место в первые несколько миллионов лет существования Солнечной системы. В частности, радиоизотопная хронология HED-метеоритов, источником которых считается Веста, указывает на то, что разогрев и дифференциация Весты произошли в первые три миллиона лет после ее аккреции (для Марса этот период длился около 15 млн. лет, а для Земли – 30 млн. лет (Kleine и др., 2002; Russel и др., 2006)). Вполне вероятно, что в тот период сформировалось намного больше Весто-подобных астероидов, но они были разрушены в результате столкновений (Keil, 2002). Таким образом, Веста – это действительно один из наиболее уникальных астероидов.

Известно, что процессы переработки поверхности микрометеоритной бомбардировкой, облучением ионами солнечного ветра и высокоэнергети-

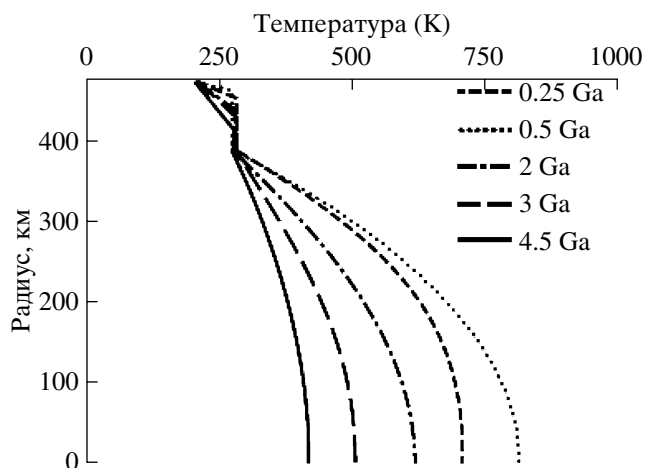


Рис. 6. Эволюция температурного профиля Цереры во времени на протяжении 0.25–4.5 млрд. лет согласно модели McCord и Sotin (2005) (рис. 5).

ческими космическими лучами заметно изменяют спектральные свойства силикатных тел (Луна, астероиды S-типа), вызывая потемнение и покраснение их поверхностей. Vernazza и др. (2006) осуществили эксперимент по облучению ионами метеорита Bereba (эвкрит), спектральные свойства которого достаточно хорошо соответствуют свойствам поверхности Весты. Целью этого эксперимента была имитация воздействия солнечного ветра на поверхность Весты. Результаты эксперимента интерпретированы так, что если бы ионы солнечного ветра облучали поверхность Весты, то ее спектр был бы намного более красным, а альbedo – более низким. Таким образом, ионы солнечного ветра не достигают поверхности астероида, что предполагает наличие у него магнитного поля, экранирующего поверхность от солнечного ветра. Авторы эксперимента уверены, что они осуществили первое дистанционное обнаружение магнитного поля у астероида.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТЕЙ

По своим оптическим свойствам Церера и Веста являются совершенно разными астероидами, что является следствием различных минералогий их поверхностей. В табл. 3 приведены основные оптические характеристики астероидов (визуальное геометрическое альbedo, показатели цвета, фазовый коэффициент блеска, максимальная отрицательная поляризация P_{min} и наклон фазовой кривой поляризации h).

Как уже отмечалось, диапазон вариаций альbedo и показателей цвета по поверхности Цереры является малым по сравнению с другими астероидами и некоторыми ледяными спутниками (Li и др., 2006), т.е. поверхность Цереры является фотометрически

Таблица 3. Оптические характеристики астероидов

Астероид	Альbedo p_v	$U-B$	$B-V$	$V-R$	$R-I$	Фаз. коэфф. блеска	P_{min} , %	Наклон h
1 Церера*	0.07–0.10	0.43	0.71	0.56	0.93	0.039	1.70	0.257
4 Веста	0.26–0.42 ⁺	0.51	0.78	0.59	0.26	0.024	0.61	0.065

* Согласно Parker и др. (2002) альbedo Цереры в ближней УФ-области (0.364 мкм) составляет 0.056.

⁺ IRAS-альbedo.

однородной. Однообразие по альbedo вместе с большим содержанием воды предполагает, что поверхность Цереры была заново сформирована (resurfaced) в результате таяния льдов на стадии окончания фазы интенсивной бомбардировки в процессе образования Солнечной системы.

Радарные данные (Mitchell и др., 1996) показали, что поверхность Цереры является очень шероховатой на шкалах от метров до 10 км. В то же время на шкалах сантиметры–дециметры поверхность Цереры является более гладкой, а Весты – более шероховатой, чем лунная поверхность, что может быть объяснено различиями в прочности их вещества. Предполагается, что оба астероида покрыты слоем реголита, толщиной по крайней мере в десятки метров, который накапливается и перерабатывается в результате бомбардировки их поверхностей. При этом реголит Цереры из-за меньшей прочности вещества должен быть более тонкозернистым.

Наблюдения показали, что оба астероида являются поляриметрически уникальными. Согласно

нашим $UBVRI$ -наблюдениям в 1986 г. (Бельская и др., 1987) Церера показывает монотонное возрастание позиционного угла плоскости поляризации с длиной волны величиной в 2° на интервале длин волн 0.37–0.83 мкм, что в несколько раз превышает точность наблюдений. Такое же возрастание угла имело место в высокоточных UBV -наблюдениях Цереры, проведенных в 1974 г. (Zellner, Gradie, 1976), а также в наблюдениях Розенбуш в 1988 г. и Cellino в 1990 г. (рис. 7). Однако повторные наши наблюдения в 1991 г. никакого возрастания позиционного угла не показали (см. Лупишко, 1998), хотя точность этих наблюдений была несколько ниже, чем в 1986 г. и в 1974 г.

Вполне очевидно, что для изучения этого эффекта нужны дополнительные высокоточные наблюдения Цереры. Однако что можно сказать уже сейчас о возможной причине спектральной зависимости угла θ_p , если она действительно существует?

В 1989 г. американские исследователи Fanale и Salvail (1989) опубликовали статью о водном режиме на поверхности Цереры. Согласно их модели Церера содержит в своих недрах значительное количество воды в форме подпочвенного льда, который сохранился там на глубинах 10–100 м вблизи экватора и 1–10 м на широтах, больших 40° . Ожидаемая скорость потери воды астероидом составляет от 30 до 300 г/с, что соответствует содержанию воды вблизи поверхности $\sim 10^4$ мол/см³. Модель указывает на то, что при альbedo поверхности Цереры, равном 0.08–0.09, лед может существовать в форме неустойчивого состояния с вышеуказанной скоростью потерь только на широтах, больших 80° . На остальной поверхности скорость потери воды должна быть на порядок величины больше.

Если это так, то должен иметь место процесс фотодиссоциации молекул воды, и тогда напрашивается вопрос, не обусловлен ли поворот плоскости поляризации с длиной волны существованием вокруг Цереры тонкой газовой или газовой-пылевой оболочки? Эта идея была высказана одним из авторов этой статьи на планетной конференции Американского астрономического общества (DPS), проходившей в Пало Альто (Калифорния, США) в ноябре 1991 г. (Lupishko и др., 1991). На следующий год американцы A'Hearn и Feldman (1992) сообщили об обнаружении вблизи северного полюса Цереры эмиссии молекул радикала OH ($\lambda 3080 \text{ \AA}$), образу-

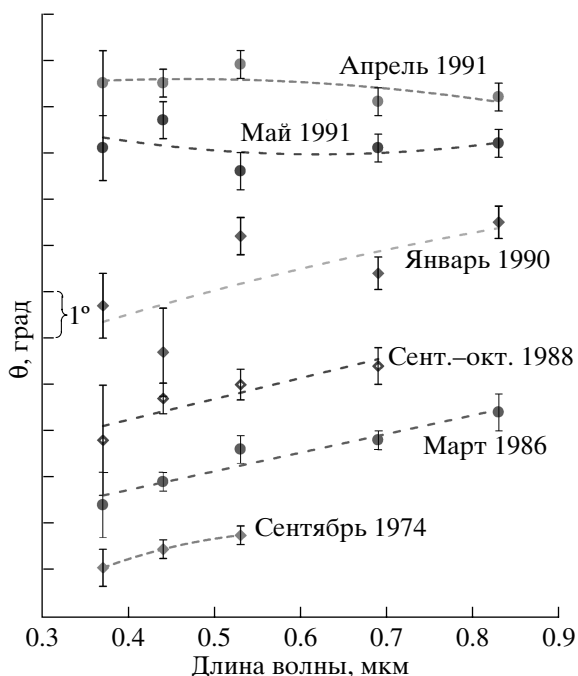


Рис. 7. Спектральная зависимость позиционного угла плоскости поляризации Цереры по наблюдениям разных авторов в разные противостояния.

щихся в результате фотодиссоциации молекул воды (о чем уже сообщалось выше).

Таким образом, скорее всего монотонное возрастание с длиной волны позиционного угла плоскости поляризации Цереры обусловлено наличием у нее воды. Однако более вероятным, на наш взгляд, является влияние не чрезвычайно тонкой газовой оболочки вокруг нее, а существование изморози (кристаллов инея) на ее поверхности вблизи северного полюса (т.е., полярной шапки).

Вариации степени отрицательной поляризации по диску Весты были измерены в США еще в 1970-х годах (Degewij и др., 1979), а в 1986 г. подтверждены Н.Н. Киселевым по наблюдениям на Советско-Болливийской обсерватории в рамках Всесоюзной программы “Веста-86”, объявленной Рабочей группой “Астероиды” (см. Лупишко и др., 1988). Его одновременные измерения блеска и поляризации в полосе *V*, кроме того, показали четкую обратную корреляцию модуля степени отрицательной поляризации и блеска при вращении астероида вокруг своей оси. Поскольку кривая блеска Весты обусловлена не столько формой, сколько распределением альbedo по поверхности, то обратная корреляция модуля отрицательной поляризации и блеска Весты есть не что иное, как проявление закона Умова. Таким образом, на примере Весты видно, что закон Умова справедлив и для отрицательной поляризации.

В 1990 г. на 1.25-м рефлекторе КрАО были проведены поляриметрические *UBVRI*-наблюдения Весты в течение ее полного оборота вокруг оси (5.342 ч) (Lupishko и др., 1999). В полосе *V* относительные вариации степени поляризации оказались максимальными $\Delta P/P = 0.24$, поскольку они были получены при экваториальном аспекте астероида. Имеет место обратная корреляция степени поляризации в полосе *V* с кривой блеска в этой же полосе. Одновременно был получен совершенно новый результат (не только для Весты, но для астероидов вообще) – это вариации позиционного угла плоскости поляризации θ с вращением астероида вокруг своей оси (рис. 8). Они оказались максимальными в полосе *U* ($\Delta\theta = 8^\circ$) и минимальными в полосе *I* (2.5°). Характер изменения вариаций по спектру, а также с фазой вращения свидетельствует в пользу их реальности (замкнутая циклическая диаграмма параметров Стокса *Q* и *U* Весты на периоде вращения подтверждает это). Повторные наблюдения Весты в 1996 г. тоже при экваториальном аспекте, однако только в полосах *UBV* и только на протяжении 0.6 периода оборота астероида, подтвердили наличие вариаций с вращением позиционного угла θ и дали даже несколько большую их амплитуду. Кроме того, в оба противостояния имеют место систематические отклонения плоскости поляризации от плоскости рассеяния в среднем на два градуса. Наблюдаемое поведение угла θ объяснено существованием на поверхности Весты линейных, упорядо-

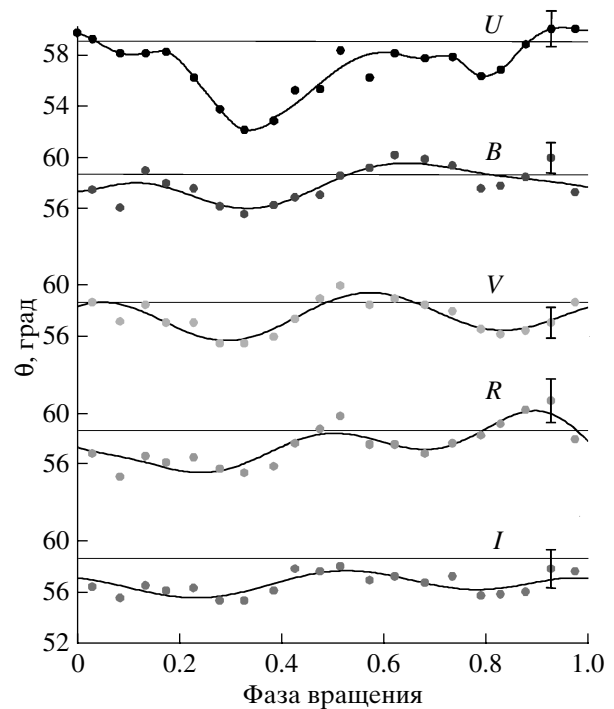


Рис. 8. Вариации позиционного угла плоскости поляризации Весты с вращением ее вокруг своей оси. Вертикальной стрелкой указано положение центра кратера.

ченно ориентированных структур типа “grooves” (борозды, трещины) и/или склонов, образовавшихся вместе с гигантским кратером ($D = 460$ км), обнаруженным на Весте с помощью ИСЗ HST. Сопоставление вариаций угла θ по фазе вращения с топографией Весты, т.е. положением кратера на диске, хорошо согласуется с предложенной гипотезой (Lupishko и др., 1999).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миссия Dawn является первой, которая предусматривает выход КА на орбиты вокруг астероидов главного пояса. Выбор этих двух астероидов – Церера и Веста – глубоко обоснованный. Считается, что только крупнейшие астероиды Церера, Паллада и Веста смогли выдержать процессы столкновительной эволюции в поясе и сохраниться за время существования Солнечной системы, а остальные астероиды являются просто фрагментами более крупных тел. Поэтому эти астероиды можно рассматривать как своего рода небольшие планеты или протопланеты (Keil, 2002; Russell и др., 2004; McCord и др., 2006). И несмотря на то, что эти протопланеты образовались и эволюционировали в непосредственной близости друг от друга, они являются совершенно разными. Церера (“влажная”) в процессе аккреции обогатилась значительным количеством воды, которая замедлила и затормозила процесс ее тепло-

вой эволюции, в результате чего она только частично продифференцировала и в настоящее время содержит подпочвенный водяной лед. А Веста (“сухая” как и HED-метеориты) предполагается прошедшей стадию расплавления и полностью продифференцировавшейся. Другие астероиды с такими свойствами неизвестны и вряд ли существуют. Таким образом, оба астероида претерпели существенную тепловую эволюцию, однако из-за совершенно разного состава вещества (и, в первую очередь, из-за различий в содержании воды) они эволюционировали по-разному и достигали при этом совершенно разных внутренних температур (McCord, Sotin, 2005; Russel и др., 2006). Поскольку период полураспада короткоживущего радиоизотопа ^{26}Al , который считается основным источником тепла, составляет 716 тыс. лет, то различие во времени начала тепловой эволюции всего в несколько сот тысяч лет может объяснить разное содержание воды у Цереры и Весты. Так, если Веста аккумулировалась из таких же планетезималей, что и Церера, но на несколько сот тысяч лет раньше, то обилие в ней ^{26}Al могло разогреть ее до такой температуры, что вся вода выпарилась, а силикаты расплавились и образовали металлическое ядро (McCord, Sotin, 2005). Как отмечают эти авторы, Веста по своей внутренней структуре и составу вещества может рассматриваться как наименьшая планета земного типа (т.е. с металлическим ядром и силикатной мантией), очень отличающаяся от Цереры, которая кажется более похожей на галилеевы ледяные спутники Юпитера Ганимед и Каллисто и по средней плотности, и по содержанию H_2O , и по частичной дифференциации недр.

Оба астероида являются объектами интенсивных наблюдений в настоящее время. Например, Li и др. (2006) недавно обнаружили в спектре Цереры интенсивную полосу поглощения (30% от интенсивности континуума), центрируемую на 280 нм. Ее отождествление может существенно пролить свет на природу астероида. В определенном смысле оба астероида могут рассматриваться как переходные объекты между силикатными (каменистыми) телами внутренней Солнечной системы и ледяными телами внешней ее части. Существование этих двух протопланет в “первозданном виде” очень важно с точки зрения общей теории образования планет, и их изучение может дать многое для понимания процессов формирования планет земной группы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бельская И.Н., Лупишко Д.Ф., Шаховской Н.М. Спектральная зависимость отрицательной поляризации некоторых астероидов // Письма в Астрон. журн. 1987. Т. 13. № 6. С. 530–534.
- Лупишко Д.Ф. 1998. Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных. Дисс. докт. физ.-мат. наук. Харьков, 1998. 259 с.
- Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н., Кварацхелия О.И. и др. Поляриметрия Весты в противостоянии 1986 г. // Астрон. вестн. 1988. Т. 22. № 2. С. 142–146.
- Лупишко Д.Ф., Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М. Вариации позиционного угла плоскости поляризации астероида 4 Веста // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. № 1. С. 50–54.
- A' Hearn M., Feldman P. Water vaporization on Ceres // Icarus. 1992. V. 98. № 1. P. 54–60.
- Binzel R.P., Xu S. Chips off of asteroid 4 Vesta: Evidence for the parent body of basaltic achondrite meteorites // Science. 1993. V. 260. P. 186–191.
- Degewij J., Tedesco E., Zellner B. Albedo and color contrast on asteroid surfaces // Icarus. 1979. V. 40. № 2. P. 364–374.
- Fanale F.P., Salvail J.R. The water regime of asteroid 1 Ceres // Icarus. 1989. V. 82. № 1. P. 97–110.
- Keil K. Geological history of asteroid 4 Vesta: “The smallest terrestrial planet” // Asteroids III / Eds Bottke W.F.Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 573–584.
- Kleine T., Munker C., Mezger K., Palme H. Rapid accretion and early core formation on asteroids and the terrestrial planets from Hf-W chronometry // Nature. 2002. V. 418. P. 952–955.
- Lebofsky L.A., Feierberg M.A., Tokunaga A.T., et al. The 1.7- to 4.2- μm spectrum of asteroid 1 Ceres: Evidence for structural water in clay minerals // Icarus. 1981. V. 48. № 2. P. 453–459.
- Li J.-Y., McFadden L.A., Parker J.W., et al. Photometric analysis of 1 Ceres and surface mapping from HST observations // Icarus. 2006. V. 182. № 1. P. 143–160.
- Lupishko D.F., Efimov Yu.S., Shakhovskoj N.M. Ceres` peculiar polarization // Abstr. for the 23rd Ann. Meet. of DPS (Amer. Astron. Soc), Nov. 4–8, 1991. Palo Alto, California (USA). 1991. P. 184.
- Lupishko D.F., Efimov Yu.S., Shakhovskoj N.M. Position-angle variations of the polarization plane of asteroid 4 Vesta // Sol. Syst. Res. 1999. V. 33. № 1. P. 45–48.
- McCord T.B., Adams J.B., Johnson T.V. Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications // Science. 1970. V. 168. P. 1445–1447.
- McCord T.B., McFadden L.A., Russell C.T., Sotin C. Ceres, Vesta, and Pallas: Protoplanets, not asteroids // Eos. 2006. V. 87. № 10. P. 105, 109.
- McCord T.B., Sotin C. Ceres: Evolution and current state // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. DOI:10.1029/2004JE002377, E05009-1-E05009-14.
- Mitchell D.L., Ostro S.J., Hudson R.S., et al. Radar observations of asteroids 1 Ceres, 2 Pallas, and 4 Vesta // Icarus. 1996. V. 124. № 1. P. 113–133.
- Parker J.W., Stern S.A., Thomas P.C., et al. Analysis of the first disk-resolved images of Ceres from ultraviolet observations with the Hubble Space Telescope // Astron. J. 2002. V. 123. P. 549–557.
- Rayman M.D., Fraschetti T.C., Raymond C.A., Russell Ch.T. Dawn: A mission in development for exploration of main belt asteroids Vesta and Ceres // Acta Astronautica. 2006. V. 58. P. 605–616.
- Rivkin A.S., Volquardsen E.L., Clark B.E. The surface composition of Ceres: Discovery of carbonates and iron-rich clays // Icarus. 2006. V. 185. № 2. P. 563–567.

- Russell C.T., Coradini A., Christensen U., et al.* Dawn: A journey in space and time // *Planet. and Space Sci.* 2004. V. 52. P. 341–365.
- Russell C.T., Capaccioni F., Coradini A., et al.* Dawn Discovery mission to Vesta and Ceres: Present status // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. P. 2043–2048.
- Thomas P.C., Binzel R.P., Gaffey M.J., et al.* Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble Space Telescope results // *Science*. 1997. V. 277. P. 1492–1495.
- Thomas P.C., Parker J.Wm., McFadden L.A., et al.* Differentiation of asteroid Ceres as revealed by its shape // *Nature*. 2005. V. 437. P. 224–226 (08 Sep 2005) Letter.
- Vernazza P., Brunetto R., Strazzulla G., et al.* Asteroid colors: A novel tool for magnetic field detection? The case of Vesta // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 451. P. L43–L46.
- Webster W.J., Johnston K.J.* Passive microwave observations of asteroids // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 213–227.
- Zellner B., Gradie J.* Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids // *Astron. J.* 1976. V. 81. № 4. P. 262–280.
- Zellner B.H., Thomas P.C.* Press Release 1997–27 // *Space Telescope Sci. Inst., Baltimore, Md.* 1997.